

FIGURA N° 12

DETERMINACION TEORICO-EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DE ORIFICIO RESTRINGIDO

Klaus J. Pontani Riegel (\*)

RESUMEN

La determinación de los coeficientes de resistencia es uno de los problemas que enfrenta el ingeniero hidráulico que proyecta una chimenea de equilibrio de orificio restringido.

El objetivo de este trabajo es mostrar en dos casos, el de las centrales Colbón (Chile) y Randens (Francia), los coeficientes que se calcularon mediante la literatura técnica disponible, para luego compararlos con los valores experimentales obtenidos de los respectivos modelos hidráulicos.

Esta comparación permitió evaluar en estas dos obras, hasta qué punto los coeficientes calculados concuerdan con los experimentales y deducir algunas recomendaciones relativas a la forma de abordar dicho cálculo.

(\*) Ingeniero Civil, División Estudios Hidráulicos, ENDESA. Profesor Auxiliar Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile.

## 1. INTRODUCCION.

Se presenta en este trabajo un análisis de los coeficientes de resistencia de dos chimeneas de equilibrio del tipo de orificio restringido.

Se comparan los valores calculados, al evaluar las pérdidas de carga singulares mediante las tablas y los gráficos de la bibliografía, con los valores experimentales obtenidos mediante los respectivos modelos hidráulicos.

A partir de esta comparación, el presente estudio trata de obtener conclusiones que permitan realizar el anteproyecto del orificio de una chimenea de equilibrio.

Las dos chimeneas de orificio restringido analizadas son las de las centrales Colbún (Chile) y Randens (Francia), cuyos orificios se estudiaron en modelos hidráulicos a escala 1:40 y 1:25 respectivamente (ver figura N°1).

La mayor dificultad para determinar con exactitud los coeficientes de resistencia de ambas chimeneas a partir de la literatura técnica, radica en la cercanía y por ende, la interacción de los distintos elementos que individualmente dan origen a la pérdida de carga total del orificio.

## 2. DETERMINACION DE R Y R' A PARTIR DE LA LITERATURA TECNICA DISPONIBLE.

### 2.1 VALORES DE R.

El coeficiente de resistencia R para caudales ascendentes (que desde la aducción entran a la chimenea) se define como la diferencia entre la cota piezométrica en la sección del túnel de aducción ubicada inmediatamente aguas arriba de la chimenea y el nivel de agua en el pique de ésta.

Su expresión matemática es:

$$R = (B_t - B_{ch}) + \frac{v_{ch}^2}{2g} - \frac{v_t^2}{2g}$$

Cuando se calcula R, surge la dificultad de evaluar el término  $(B_t - B_{ch})$ , para lo cual se analizaron las siguientes alternativas:

- Sumar la totalidad de las pérdidas de carga que crea por separado cada una de las posibles singularidades en que puede descomponerse el orificio, suponiendo que cada una de ellas está suficientemente separada de las demás como para evitar la interacción entre ellas. Al aplicar es-

te criterio resulta  $R_1$ .

- Considerar sólo la mayor de las pérdidas de carga de las antes mencionadas, criterio propuesto por L. Levin (2) para obras complejas cortas (L. Levin define como obras complejas cortas aquellas con varios elementos generadores de pérdidas de carga situados a menos de 4 veces el radio hidráulico correspondiente a la sección que produce la contracción). Utilizando este otro criterio se obtiene  $R_2$ .

#### 2.1.1 Chimenea de equilibrio de la central Colbún.

El orificio de esta chimenea, cuya geometría se muestra en la figura N°1, se asimiló a una bifurcación (entre el túnel de aducción y la chimenea de equilibrio) seguida de un ensanche brusco (entre el orificio y el pique de la chimenea).

La expresión para la pérdida de carga en la bifurcación queda dada por:

$$\Delta B_{t-o} = K_{t-o} \frac{v_t^2}{2g} = 3,08 \times 10^{-5} K_{t-o} Q_t^2$$

en que  $K_{t-o}$  se obtuvo de la curva de bifurcaciones correspondiente a  $A_o/A_t = 0,293$ , la que a su vez se dedujo de las curvas de A. Gardel (1)

La expresión de la pérdida por ensanche se logró mediante la fórmula de Borda:

$$\Delta B_{o-ch} = \frac{(v_o - v_{ch})^2}{2g} = 2,86 \times 10^{-4} Q_{ch}^2$$

Si se consideran entonces ambas, o bien, sólo la mayor de éstas pérdidas, se obtiene  $R_1$  calc o  $R_2$  calc, respectivamente.

#### 2.1.2 Chimenea de equilibrio de la central Randens

El orificio de esta chimenea, cuyo esquema también se incluye en la figura N°1, es bastante más complejo que el anterior, por lo que se requirió de una serie de hipótesis simplificadoras que permitieran asimilar el orificio a diversos elementos que producen pérdidas de carga, cuyos valores se incluían en los gráficos y tablas de la bibliografía. Fué así como el orificio se descompuso en una bifurcación (entre el túnel y el orificio), un cambio de dirección con aumento de la sección de salida (en el orificio mismo) y un ensanche brusco (entre la sección de salida del orificio y el pique de la chimenea).

Si bien esta bifurcación (que pasa de una sección circular a una rectangular y no se cortan los ejes de ambas) no corresponde exactamente al tipo de singularidad estudiada por A. Gardel, se estimó que se podrían utilizar sus gráficos, deduciéndose la curva correspondiente a  $A_o/A_t = 0,222$  del gráfico de la figura N°2, de donde:

$$\Delta B_{t-o} = K_{t-o} \frac{v_t^2}{2g} = 6,38 \times 10^{-5} K_{t-o} Q_t^2$$

El cambio de dirección en el interior del orificio se abordó con la referencia bibliográfica (3) suponiendo que ésta se realizaba a ancho constante. Para un codo brusco de 90° de sección rectangular, con aumento de sección de salida, paredes rugosas y un número de Reynolds superior a  $4 \times 10^4$  se obtuvo entonces una pérdida de carga:

$$\Delta B_{o-o} = K_{o-o} \frac{v_o^2}{2g} = 1,36 \times 10^{-3} Q_{ch}^2$$

La pérdida de carga del ensanche brusco se calculó mediante la fórmula de Borda suponiendo que aún se mantenía el ancho del chorro considerado en el cálculo del cambio de dirección, obteniéndose:

$$\Delta B_{o-ch} = \frac{(v_o - v_{ch})^2}{2g} = 2 \times 10^{-4} Q_{ch}^2$$

Conocidas estas pérdidas de carga, se calcularon los respectivos valores de  $R_1 \text{ calc}$  y  $R_2 \text{ calc}$ .

## 2.2. VALORES DE $R'$ .

El coeficiente de resistencia  $R'$  para caudales descendentes (que salen de la chimenea de equilibrio y en el caso analizado en el presente trabajo, escurren hacia las tuberías), se define como la diferencia entre la cota piezométrica en el túnel de aducción inmediatamente aguas arriba de la chimenea y el nivel de agua en el pique de ésta. Su expresión matemática es:

$$R' = - (B_{ch} - B_t) - \frac{v_t^2}{2g} + \frac{v_{ch}^2}{2g}$$

en que el término  $(B_{ch} - B_t)$  puede evaluarse utilizando las mismas alternativas planteadas en el caso de  $R$ , a saber, como la suma de la totalidad de las pérdidas de carga individuales o contabilizando sólo la mayor de ellas, resultando así  $R'_1 \text{ calc}$  y  $R'_2 \text{ calc}$  respectivamente.

## 2.2.1 Chimenea de equilibrio de la central Colbún

Para los caudales descendentes, el orificio de esta chimenea se asimiló a un ensanche de reacción posterior a una contracción (en el orificio, inmediatamente aguas abajo del pique de la chimenea) seguido de una confluencia (entre el orificio y el túnel de aducción).

La contracción del escurrimiento y el ensanche de reacción que le sigue se abordaron con la referencia (6), recurriendo nuevamente a la fórmula de Borda para calcular la respectiva pérdida de carga:

$$\Delta B_{ch-o} = 1,04 \times 10^{-4} Q_{ch}^2$$

La pérdida de carga que se produce entre el orificio de la chimenea y la sección del túnel ubicada inmediatamente aguas arriba de ésta, y que es creada por la confluencia, se calculó mediante la curva correspondiente a  $A_o/A_{tb} = 0,293$  del gráfico de la figura N°2, basada ésta a su vez en los gráficos de A. Gardel:

$$\Delta B_{o-t} = K_{o-t} \frac{v_{tb}^2}{2g} = 3,08 \times 10^{-5} K_{o-t} Q_{tb}^2$$

Conocidos los valores de las pérdidas de carga, se calcularon los respectivos  $R'_1 \text{ calc}$  y  $R'_2 \text{ calc}$ .

## 2.2.2 Chimenea de equilibrio de la central Randens

Siendo válidas las mismas consideraciones que se hicieron para los caudales ascendentes, se asimiló el orificio de esta chimenea para caudales descendentes a un ensanche de reacción posterior a una contracción imperfecta y parcialmente suprimida (entre el pique de la chimenea y el orificio), seguida de un cambio de dirección con disminución de la sección de salida (como parte del orificio mismo) y una confluencia (entre el orificio y el túnel de aducción).

La magnitud de la contracción imperfecta y parcialmente suprimida que se produce inmediatamente aguas abajo del pique de la chimenea, se calculó mediante la referencia bibliográfica (6). Conocido este valor se determinó la pérdida de carga en el ensanche de reacción mediante la fórmula de Borda:

$$\Delta B_{ch-o} = 3,27 \times 10^{-5} Q_{ch}^2$$

La pérdida de carga debida al cambio de dirección del es-

currimiento en el orificio se determinó mediante las tablas y gráficos de la referencia (3), aceptando que éste se realiza con un ancho constante e igual al que tiene el orificio en la sección de encuentro con el túnel. Para un codo brusco de 90° de sección rectangular, con disminución de la sección de salida, paredes rugosas y un número de Reynolds superior a  $4 \times 10^4$  se obtuvo entonces:

$$\Delta B_{o-o} = K_{o-o} \frac{v_o^2}{2g} = 9,12 \times 10^{-4} Q_{ch}^2$$

Finalmente, si bien, como ya se mencionará anteriormente, el tipo de confluencia entre el orificio y el túnel de aducción de esta central no corresponde exactamente al estudiado por A. Gardel, se emplearon sus gráficos para deducir de ellos la curva correspondiente a  $A_o/A_{tb} = 0,222$ , con lo que la pérdida de carga debida a esta singularidad resultó ser:

$$\Delta B_{o-t} = K_{o-t} \frac{v_{tb}^2}{2g} = 6,38 \times 10^{-5} K_{o-t} Q_{tb}^2$$

A partir de estas pérdidas de carga se calcularon los respectivos valores de  $R'_1$  calc y  $R'_2$  calc.

### 3. DETERMINACION EXPERIMENTAL DE R Y R'

Del diseño adecuado del orificio de una chimenea de equilibrio del tipo orificio restringido, dependen no sólo las dimensiones y el funcionamiento de la chimenea, sino también el de las demás obras de una central hidroeléctrica. Considerando lo complejo que resulta este diseño, no sólo desde el punto de vista de las pérdidas de carga sino también en cuanto al buen funcionamiento hidráulico (el que evite despegue de las venas, cavitación, formación de vórtices etc.) se estimó indispensable recurrir a un modelo hidráulico, tanto en el caso de la central Colbún como de la central Randens.

El estudio en modelo del orificio de la chimenea de la central Colbún, de escala Froude 1:40 y caudal máximo de prototipo  $280 \text{ m}^3/\text{s}$ , fué contratado con el Centro de Recursos Hidráulicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Los pormenores de la investigación y los resultados obtenidos están en la referencia (5).

A su vez, el estudio en modelo del orificio de la chimenea de la central Randens, de escala Froude 1:25 y caudal máximo de prototipo de

$100 \text{ m}^3/\text{s}$ , se realizó en el Laboratoire National d'Hydraulique (Chatou), investigación cuyos detalles y resultados se registraron en la referencia (4).

Es de interés señalar que en ambos casos se llegó a la conclusión que los resultados eran igualmente válidos si las medidas de R y R' se hacían para régimen permanente en vez de impermanente, hecho que facilitaba sustancialmente la investigación.

En el caso de la central Colbún, las medidas de R y R' se hicieron para cuatro niveles de agua distintos en el pique de la chimenea. En este trabajo se compararon solamente los valores de R y R' correspondientes a la cota mayor, con los valores calculados en el capítulo anterior. Esto se debe a que con esa cota se logra un desarrollo más completo de la pérdida por expansión brusca en el caso de los caudales ascendentes y una alimentación más tranquila y uniforme en el caso de los caudales descendentes, lo que estaría en mejor concordancia con las hipótesis de cálculo empleadas en la determinación de las pérdidas de carga realizada en el punto 2.

### 4. COMPARACION DE LOS R Y R' CALCULADOS Y EXPERIMENTALES

En los gráficos de las figuras 3 y 4 se comparan los valores de R y R' experimentales con aquellos calculados en la forma descrita en el punto 2. Cada uno de ellos lleva tres rectas:

- Una que forma 45° con los ejes de coordenadas, la que correspondería a la igualdad de R exp con R calc, o R' exp con R' calc, vale decir, la situación óptima.
- Una que relaciona R exp con  $R_1$  calc o R' exp con  $R'_1$  calc, las que se trazaron mediante el criterio de los mínimos cuadrados.
- Una que relaciona R exp con  $R_2$  calc o R' exp con  $R'_2$  calc, trazadas en la misma forma anterior.

Del análisis de los gráficos de las figuras 3 y 4 y de los valores mismos de R y R' se desprenden los siguientes hechos:

- En el gráfico (a) de la figura N°3 (central Colbún, caudales ascendentes) se observa que la recta R exp vs.  $R_2$  calc y la recta a 45° son prácticamente coincidentes, o sea, en este caso se demostró ser totalmente válida la hipótesis de considerar sólo la mayor de las pérdidas de carga (hipótesis de L. Levin) en el cálculo de R. No sucede lo mismo con la recta R exp vs.  $R_1$  calc, que da valores de R francamente mayores a los reales.

- En el gráfico (a) de la figura N°4 (central Randens, caudales ascendentes), la recta a 45° se ubica entre las rectas  $R_{exp}$  vs.  $R_1$  calc y  $R_{exp}$  vs.  $R_2$  calc, situándose más cerca de esta última. De allí se desprende que al considerar sólo la mayor de las pérdidas de carga se obtienen valores de  $R_{calc}$ , que si bien no son tan concordantes con  $R_{exp}$  como en el caso anterior, están perfectamente dentro de un orden de magnitud aceptable.

De lo anterior se puede deducir que mientras más sencilla es la geometría del orificio, mejor es la concordancia entre  $R_2$  calc y  $R_{exp}$ , y a su vez, mientras más complejo es éste, más se aleja  $R_2$  calc de  $R_{exp}$ . Esto se explica por el hecho que por un lado la cercanía de los elementos que producen las pérdidas de carga no permite que estas individualmente se desarrollen en su totalidad, por lo que  $R_{calc}$  necesariamente debe ser menor que aquel que se obtiene con la suma de todas las pérdidas, y por otro lado, mientras más complejo es el orificio, mayor es el número de elementos que generan pérdidas, por lo que la mayor de ellas va perdiendo importancia relativa frente a la suma de las restantes.

- En el gráfico (b) de la figura N°3 (central Colbún, caudales descendentes) la recta  $R_{exp}$  vs.  $R_1'$  calc es prácticamente coincidente con la recta a 45°, lo que indica que en este caso la pérdida de carga del orificio es prácticamente igual a la suma de las pérdidas individuales. A su vez, la curva  $R_{exp}$  vs.  $R_2'$  calc arroja valores de  $R_2'$  calc que aún son del orden de magnitud de  $R_{exp}$ .
- En el gráfico (b) de la figura N°4 (central Randens, caudales descendentes) tanto la recta  $R'_{exp}$  vs.  $R_1'$  calc como la recta  $R'_{exp}$  vs.  $R_2'$  calc están bastante alejadas de la recta a 45°, arrojando valores de  $R'_{calc}$  bastante inferiores a  $R'_{exp}$ .

De los dos puntos anteriores se desprende que tratándose de un orificio más sencillo (como el de la central Colbún),  $R_1'$  calc tiene una buena concordancia con  $R'_{exp}$ . Por el contrario, tratándose de orificios más sofisticados (como el de la central Randens), aún cuando se empleen hipótesis de cálculo que arrojen pérdidas de carga individuales que se estima están abultadas, los  $R'_{calc}$  resultan bastante inferiores a los  $R'_{exp}$ .

- Finalmente vale la pena señalar que en el caso de los caudales descendentes de ambos casos analizados, el valor de  $R'_{exp}$  y el de  $R'_{calc}$  que más

se le aproxima, son prácticamente constantes para un mismo valor de  $Q_{ch}$ , vale decir que  $R'$  es solamente función de  $Q_{ch}$ . No se observa lo mismo para  $R_{exp}$  o  $R_{calc}$ .

## 5. CONCLUSIONES.

De los antecedentes expuestos en los capítulos anteriores puede concluirse que:

- Para los caudales ascendentes se logra una buena concordancia entre los valores experimentales y los calculados del coeficiente de resistencia, cuando en estos últimos se considera sólo la mayor de las pérdidas de carga.
- Tratándose de los caudales descendentes, se obtienen mejores resultados cuando en la determinación del coeficiente de resistencia se incluye la totalidad de las pérdidas de carga del orificio. La concordancia lograda entre los valores calculados y los experimentales es muy satisfactoria en el caso del orificio de la chimenea de equilibrio de la central Colbún, pero no lo es en el de la central Randens. Es por eso que los coeficientes de resistencia descendentes así calculados solo proporcionan un orden de magnitud de su valor real.
- La concordancia entre los valores experimentales y los calculados de los coeficientes de resistencia ascendentes y descendentes, mejora en la medida que es más sencilla la geometría del orificio estudiado.
- Los valores de los coeficientes de resistencia ascendentes y descendentes obtenidos mediante el cálculo, sirven sólo para el diseño de anteproyecto y para iniciar el estudio en modelo de la chimenea de equilibrio, el que se estima es indispensable.

## BIBLIOGRAFIA

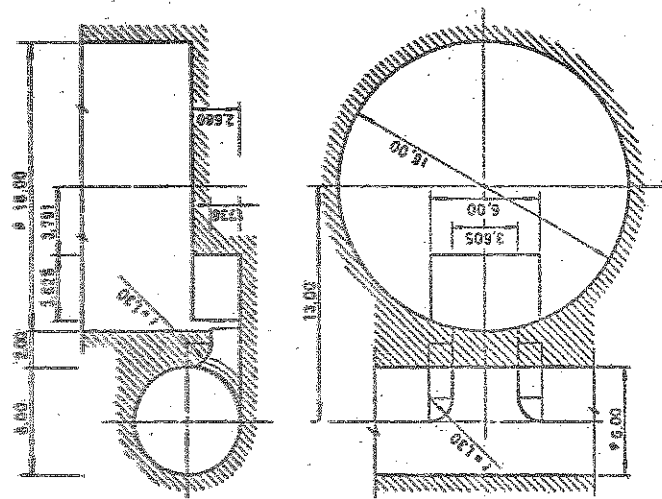
1. André Gardel: "Chambres d'équilibre"  
F. Rouge & Cie - 1956 (Lausanne)
2. León Levin: "De la détermination des pertes de charge dans l'étranglement des cheminées d'équilibre".  
La Houille Blanche - No. 5 - Octobre 1953
3. I. E. Idel'Chik: "Mémento de Pertes de Charge".  
Eyrolles (Editeur Paris) - 1969
4. "Cheminée d'équilibre de Randens"  
Laboratoire National d'Hydraulique (Chatou) et Electricité de France  
Serie A - Août 1953.
5. "Chimenea de equilibrio de la central Colbún. Estudio en modelo del orificio".  
Univ. de Chile - Centro de Recursos Hidráulicos CRH 81 - 4 - E  
(Santiago) - 1980
6. Francisco Javier Dominguez: "Hidráulica"  
Editorial Universitaria 5a. Edición 1978.

## NOTACION

- R = coeficiente de resistencia para los caudales ascendentes  
R' = coeficiente de resistencia para los caudales descendentes  
B = Bernouilli  
B = pérdida de carga entre dos secciones del escurrimiento  
K = coeficiente de pérdida de carga  
v = velocidad promedio del escurrimiento en la sección  
g = aceleración de gravedad  
t = relativo a la sección del túnel de aducción situada inmediatamente aguas arriba de la chimenea de equilibrio  
ch = relativo al pique de la chimenea de equilibrio  
o = relativo al orificio de la chimenea de equilibrio  
tb = relativo a la sección del túnel de aducción situada inmediatamente aguas abajo de la chimenea de equilibrio  
calc = valores calculados  
exp = valores experimentales  
1 = considera la totalidad de las pérdidas de carga  
2 = considera sólo la mayor de las pérdidas de carga en que puede descomponerse la pérdida de carga total del orificio.

ESQUEMAS DE LOS ORIFICIOS ESTUDIADOS

CENTRAL RANDENS



CENTRAL COLBUN

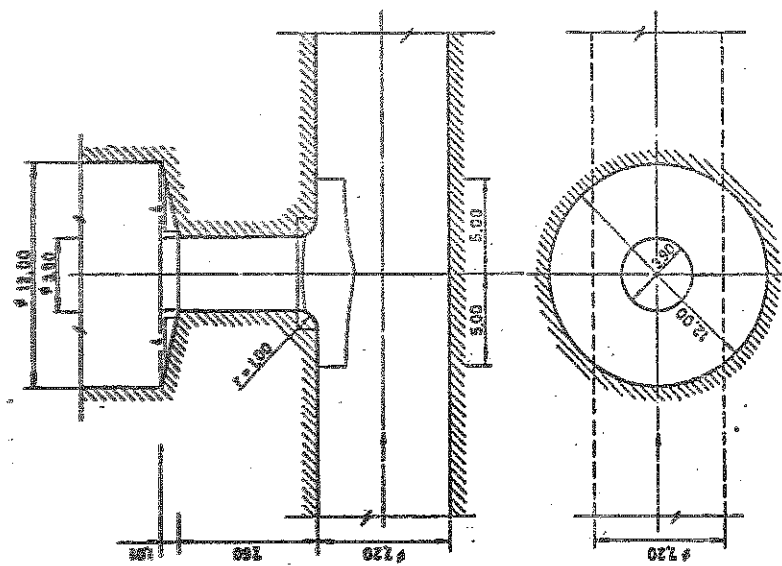
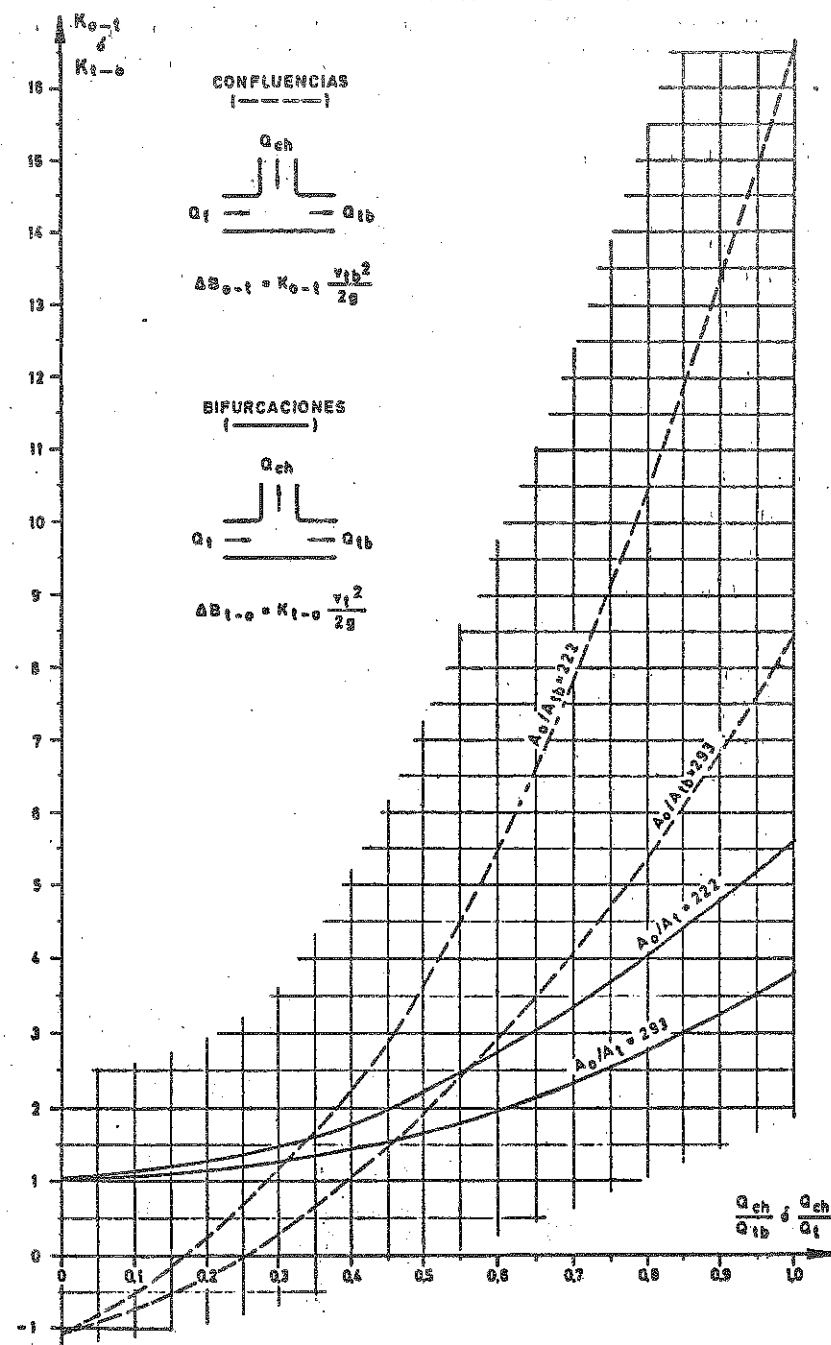


FIGURA Nº1

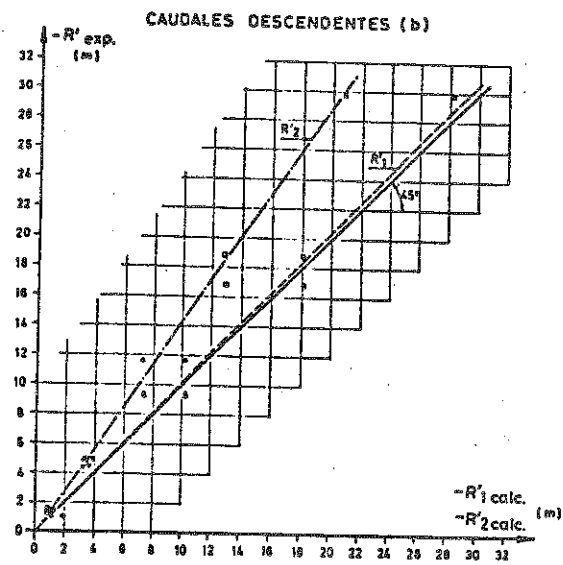
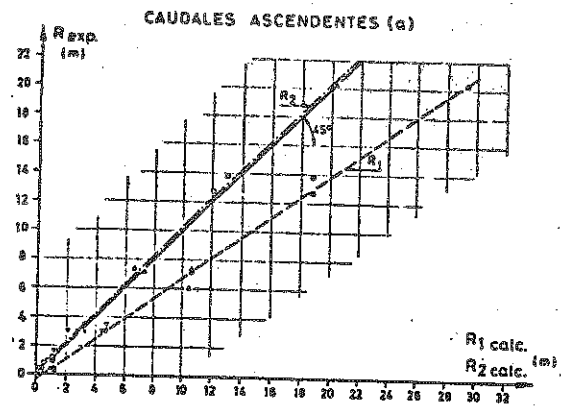
FIGURA Nº2

COEFICIENTES DE PERDIDA DE CARGA EN CONFLUENCIAS Y BIFURCACIONES SEGUN A. GARDEL



CENTRAL COLBUN

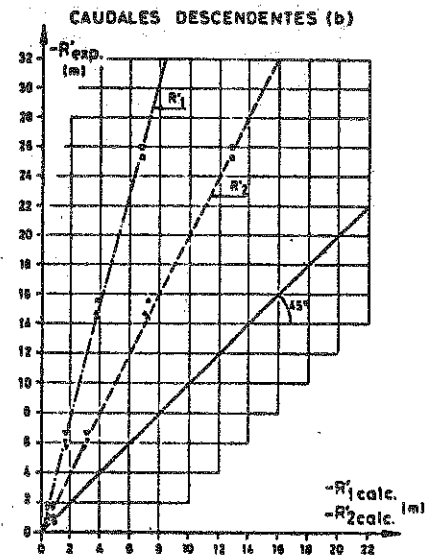
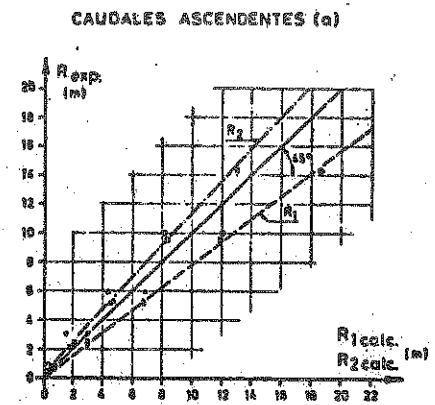
COMPARACION DE LOS R Y R' EXPERIMENTALES Y CALCULADOS



- R1 calc. & R'1 calc.      ○ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 56 m<sup>3</sup>/s
- ▽ R1 calc. & R'1 calc.      ▽ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 112 m<sup>3</sup>/s
- ◐ R1 calc. & R'1 calc.      ◑ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 168 m<sup>3</sup>/s
- ◒ R1 calc. & R'1 calc.      ◓ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 224 m<sup>3</sup>/s
- ◔ R1 calc. & R'1 calc.      ◕ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 280 m<sup>3</sup>/s

CENTRAL RANDENS

COMPARACION DE LOS R Y R' EXPERIMENTALES Y CALCULADOS



- R1 calc. & R'1 calc.      ○ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 30 m<sup>3</sup>/s
- ▽ R1 calc. & R'1 calc.      ▽ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 60 m<sup>3</sup>/s
- ◐ R1 calc. & R'1 calc.      ◑ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 90 m<sup>3</sup>/s
- ◒ R1 calc. & R'1 calc.      ◓ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 120 m<sup>3</sup>/s
- ◔ R1 calc. & R'1 calc.      ◕ R2 calc. & R'2 calc.      PARA Q<sub>ch</sub> = 150 m<sup>3</sup>/s